

射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析*

邱白晶 徐溪超 杨 宁 邓 斌 姜国微 吴春笃

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 以射流混药装置结构优化为目标,采用 CFD 方法研究了混药装置的嘴管距、面积比和吸入口角度等主要参数对混药性能的影响。用混药装置流动性能的实测值对射流混药装置数值模拟方案进行对比表明,确定的射流混药装置数值模拟方案合理。对嘴管距、面积比和吸入口角度 3 个参数进行了数值模拟。结果表明:这 3 个参数均不改变 $h-q$ 单调递减关系类型;嘴管距和吸入口角度的变化不改变 $\eta-q$ 关系类型,但面积比会改变 $\eta-q$ 曲线变化趋势。

关键词: 植保机械 混药装置 性能 参数优化 计算流体动力学

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0076-04

Simulation Analysis of Structure Parameters of Jet-mixing Apparatus on Jet-mixing Performance

Qiu Baijing Xu Xichao Yang Ning Deng Bin Jiang Guowei Wu Chundu

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Aimed at optimizing the structure of jet-mixing apparatus, effect of three main structure parameters: nozzle-tube distance, area ratio and entrainment angle on the mixing performance were investigated based on CFD technique. A mathematical model for jet apparatus was established and validated by actual experimental data. Simulated results and experiment results showed that the established model was reasonable. The results indicated that nozzle-tube distance, area ratio and entrainment angle would not change the tendency of $h-q$ with the increasing of flow ratio. However, both nozzle-tube distance and entrainment angle would not change the tendency of $\eta-q$ except for area ratio.

Key words Plant protection machines, Mixing apparatus, Performance, Parameter optimization, CFD

引言

植保机械传统预混药方式不能实现在线实时按需混药,存在混药质量不高和浪费农药等弊端^[1~4]。为克服预混药的弊端,科研人员一直在积极探索实时混药技术和设备,并期望建立相应的设计方法和试验方法^[5~7]。以 CFD 为平台,并通过试验来验证和修正 CFD 模型,已成为当前混药器设计的基本模式,并在直接注入式混药装置研发中得到应用^[8]。

关于射流混药装置的设计方法和流场分析的报道还非常有限。虽然何培杰和李羊林等对射流混药装置开展了试验研究,但试验研究的内容还限于混药装置的外部特性,如混合比、压力比等^[3,9]。何培杰等对射流混药装置的混合管进行了数值计算,得出了径向速度和轴向速度在混合管内的分布规律^[10~11]。由于射流混药是一个多级流动过程,因此仅仅对混合管进行数值计算还不足以描述混药流动过程,也不足以对射流混药装置的结构参数、工作参数及混

收稿日期: 2010-09-06 修回日期: 2010-10-29

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100905、2006AA10A305-3)、国家自然科学基金资助项目(30571240)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227110008)和江苏省属高校自然科学重大基础研究项目(10KJA470007)

作者简介: 邱白晶,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程及植保机械研究,E-mail: qbj@ujs.edu.cn

药性能进行优化。

本文采用 CFD 软件 Fluent 进行射流混药装置数值模拟,通过对嘴管距、面积比和吸入口角度进行分析,揭示结构参数对射流混药装置性能影响的规律。

1 射流混药装置结构及参数

1.1 射流混药装置

射流混药装置结构如图 1 所示,主要由射流嘴、吸药管、吸入室、混合管和扩散管组成。

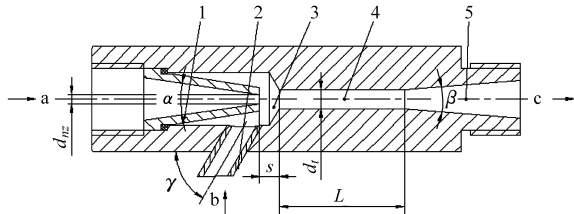


图 1 射流混药装置结构示意图

Fig.1 Schematic of jet-mixing apparatus

1. 射流嘴 2. 吸药管 3. 吸入室 4. 混合管 5. 扩散管

工作时,作为主流体的水经进口 a 进入射流混药装置,在射流嘴出口处产生负压吸引农药从进口 b 进入吸入室,并在混合管中进行混合,混合后的药水混合物经扩散管出口 c 流出混药装置。

1.2 结构参数

将结构参数分为固定参数和可变参数两类。

固定参数是指研究过程中保持不变的参数,涉及的具体参数和取值为:射流嘴收敛角 α 为 16° ,扩散管扩散角 β 为 8° ,混合管长度 L 为 17.04 mm ,混合管直径 d_t 为 3.55 mm 。

可变参数是指研究过程中需要改变参数取值以便探究其对混药性能影响的参数类别。本文以嘴管距 s 、面积比 m 和吸入口角度 γ 3 个主要参数为可变参数,但面积比 m 的改变需通过射流嘴直径 d_{nz} 来实现,所以把面积比 m 和射流嘴直径 d_{nz} 也归入可变参数。

面积比 m 定义为混合管截面积与射流嘴出口截面积之比,即

$$m = \frac{A_t}{A_{nz}} = \left(\frac{d_t}{d_{nz}}\right)^2 \tag{1}$$

式中 A_t 、 A_{nz} ——混合管和射流嘴出口截面积, mm^2
 d_t 、 d_{nz} ——混合管直径和射流嘴出口直径, mm

1.3 工作参数

由于工程上用流量比 q 与压力比 h 关系曲线以及流量比 q 与混药效率 η 的关系曲线来评价射流混药装置混药性能,因此确定混药装置工作参数为流量比 q 、压力比 h 和混药效率 η 。

流量比 q 定义为农药体积流量与水体积流量之比

$$q = \frac{Q_b}{Q_a} \tag{2}$$

式中 Q_b 、 Q_a ——农药和水体积流量, m^3/s

压力比 h 是反映射流混药装置压力损失的一个无量纲参数,压力比大,表明压力损失小。定义为

$$h = \frac{p_c - p_b}{p_a - p_b} \tag{3}$$

式中 p_a 、 p_b 、 p_c ——水进口、农药进口和混合液出口压力

混药效率 η 定义为射流混药装置的压力比与流量比的乘积,即

$$\eta = hq \tag{4}$$

2 数值模拟方案的确定

2.1 网格类型和剖分方式

Fluent 进行数值计算是在每个网格单元上进行的,因此在计算前必须对射流混药装置进行网格剖分。典型网格类型分为结构网格和非结构网格。常见的结构网格有六面体 Hex 网格,非结构网格有四面体 Tgrid 和 Tet 网格。一般来说,结构网格比非结构网格具有计算精度高和收敛快等优势。

由于射流混药装置含有形状不规则的吸入室,难以全部用六面体 Hex 结构网格对射流混药装置进行剖分,因此采用六面体 Hex 网格和四面体网格组合的网格剖分方式。对于形状不规则的吸入室结构采用适应性较好的四面体 Tgrid 网格^[12],对于射流嘴、吸药管、混合管和扩散管采用六面体 Hex 结构网格。利用网格工具 Gambit 2.2 对其进行分块剖分。考虑到射流嘴出口处流动复杂,网格剖分时对此处进行局部加密。剖分后的射流混药装置网格如图 2 所示。

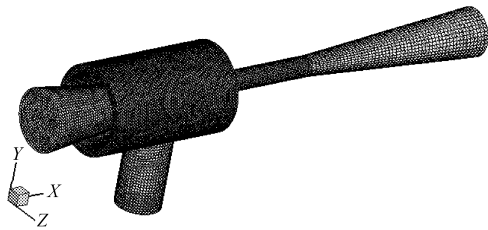


图 2 射流混药装置网格划分

Fig.2 Mesh for jet-mixing apparatus

2.2 湍流模型及边界条件

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。边界条件设置:水进口和农药进口均采用压力入口,混合液出口采用压力出口。工作介质均采用水,密度为 998.2 kg/m^3 ,粘度为 $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

2.3 离散格式及收敛准则

采用 Fluent 6.3 压力基求解器。数值计算采用有限体积法离散控制方程,对流项等各参数的离散均采用精度高的二阶迎风格式,速度和压力的耦合方式采用 SIMPLEC 模式^[13],收敛精度设置为 10^{-4} 。

2.4 壁面处理

采用标准壁面函数^[14]对射流混药装置内部流道进行处理。

2.5 数值模拟方案的试验验证

为验证上述数值模拟方案的合理性,将数值模拟结果与文献[7]进行了对比验证,结果如图3所示。

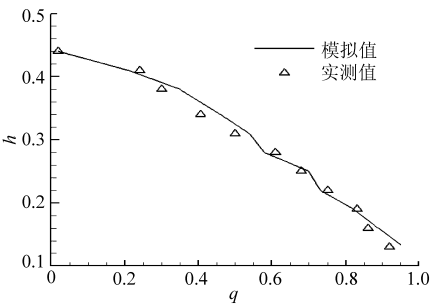


图3 实测值与模拟值对比

Fig.3 Comparison between experiment results and simulated results

由图可看出,实测值和模拟值无论从趋势上还是取值点的分布上均有较好的一致性。为了量化实测值和模拟值两者之间的偏差,引入流量比最大偏差 $\delta_{\max}$ 和流量比平均偏差 δ_{avg} 两个评价指标,分别定义为

$$\delta_{\max} = \max \{ \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n \}$$
 (5)

$$\delta_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \delta_i$$
 (6)

其中
$$\delta_i = \frac{|q_{ie} - q_{is}|}{q_{ie}} \times 100\%$$
 (7)

式中 q_{ie} ——第*i*次实测体积流量比
 q_{is} ——第*i*次模拟体积流量比
 n ——测量次数,本文取 $n = 11$

由式(5)、(6)可以计算出最大偏差 $\delta_{\max}$ 和平均偏差 δ_{avg} 分别为 5.17% 和 2.43%。

由此可知,数值模拟方案是合理的。以下均以此方案开展射流混药装置数值模拟试验,通过对主要结构参数:嘴管距、面积比及吸入口角度的分析,揭示结构参数影响射流混药装置性能的规律。

3 数值模拟方案

选取3个主要结构参数:嘴管距 s 、面积比 m 和吸入口角度 γ 作为研究对象。模拟方案如表1所示。

数值模拟时边界条件设置为:水进口相对压力为 0.32 MPa,农药进口绝对压力为 0.01 MPa,混合液出口压力为 0.14 ~ 0.04 MPa,每 0.01 MPa 为一步长。每个方案计算 44 组,共计 132 组数值。

表1 模拟设计方案

Tab.1 Design of simulation scheme

方案	嘴管距 s/mm	面积比 m	吸入口角度 $\gamma/(^\circ)$
1	2.88	2.07	90
	3.90		
	5.90		
	7.88		
2	3.90	1.49	90
		2.07	
		2.29	
		3.03	
3	3.90	2.07	30
			45
			60
			90

4 结果与讨论

4.1 结构参数数值模拟结果

数值模拟计算中采用 Fluent 作为数值平台, Fluent 给出的是水和农药进口处流量值和压力值,混合液出口处的流量值和压力值,因此需要把 Fluent 计算结果转换为 $h - q$ 和 $\eta - q$ 关系曲线。图4为结构参数对 $h - q$ 和 $\eta - q$ 关系曲线的影响。

4.2 结果分析

由图4a~4c的 $h - q$ 曲线可知,流量比 q 与压力比 h 均成单调递减关系。这表明嘴管距 s 、面积比 m 和吸入口角度 γ 3个参数的变化均不改变 $h - q$ 关系的类型。

由图4d~4f的 $\eta - q$ 曲线可知,虽然嘴管距 s 和吸入口角度 γ 的变化仍不改变 $\eta - q$ 关系类型,但面积比 m 的改变会使 $\eta - q$ 曲线类型发生改变。在面积比 m 的4个取值中,有3个出现了单峰的曲线类型,但也有一个非单峰的曲线类型;而且在出现单峰的3个 $\eta - q$ 曲线中,峰值的具体位置随面积比 m 取值变化,也即峰值位置不稳定。

在图4d和图4f中, $\eta - q$ 曲线均存在峰值,峰值的位置为流量比 $q = 0.7$ 。因此混药装置工作时应使流量比 q 保持在 0.7 附近,才能使其最大地发挥混药效率。

当流量比 q 为 0.7、吸入口角度 γ 分别为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时,对应的最大混药效率依次为 16.2、19.2、18.5 和 15.4,因此可以推知混药效率 η 最高时吸入口角度 γ 的取值区间为 $[45^\circ, 60^\circ]$ 。

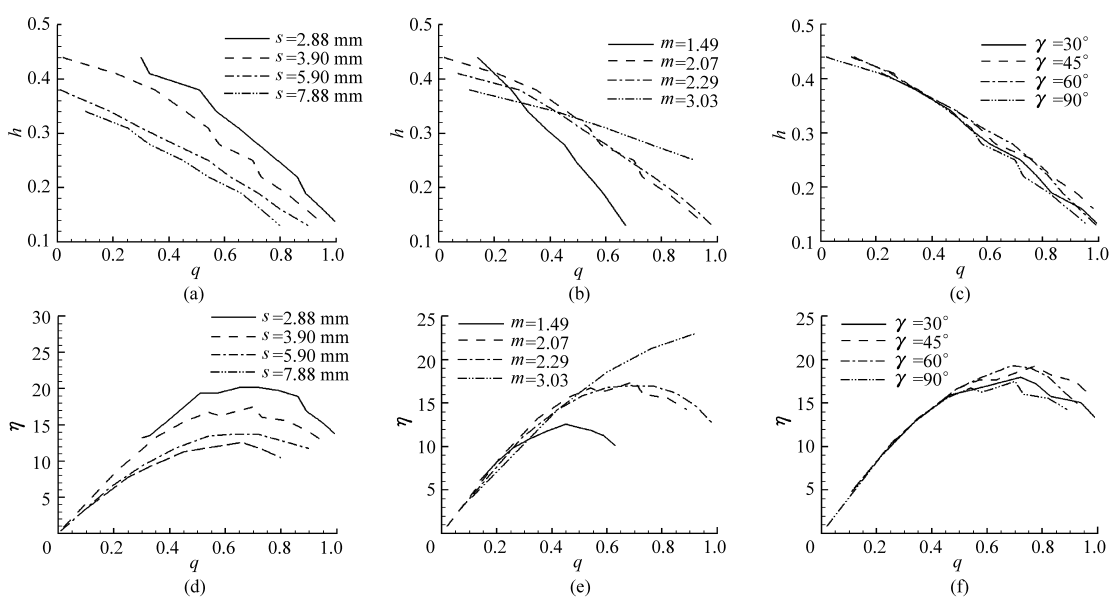


图 4 结构参数对射流混药装置性能的影响曲线

Fig. 4 Performance curves of structure parameter effect on jet-mixing apparatus

(a) 嘴管距对 $h-q$ 性能曲线的影响 (b) 面积比对 $h-q$ 性能曲线的影响 (c) 吸入口角度对 $h-q$ 性能曲线的影响
(d) 嘴管距对 $\eta-q$ 性能曲线的影响 (e) 面积比对 $\eta-q$ 性能曲线的影响 (f) 吸入口角度对 $\eta-q$ 性能曲线的影响

当流量比 q 为 0.7、嘴管距 s 取值分别为 2.88、3.90、5.90 和 7.88 mm 时,对应的最大混药效率依次为 20.8、17.2、14.1 和 12.3。可见最大混药效率与嘴管距 s 的关系是单调的,这就说明嘴管距的 4 个取值还没有包括 $\eta-q$ 曲线的拐点,故需扩大嘴管距的数值模拟范围。

5 结论

(1)用混药装置流动性能的实测值对射流混药

装置的数值模拟方案进行了对比验证,结果表明:两者之间流量比平均偏差为 2.43%,最大偏差为 5.17%,因此说明所确定的射流混药装置数值模拟方案合理。

(2)嘴管距 s 、吸入口角度 γ 和面积比 m 3 个主要参数的变化均不改变 $h-q$ 单调递减关系类型。

(3)嘴管距 s 和吸入口角度 γ 的变化不改变 $\eta-q$ 关系类型,但面积比 m 的改变会使 $\eta-q$ 曲线类型发生改变。

参 考 文 献

- Ghate S R, Perry C D. Ground speed control of pesticide application rates in a compressed air direction pesticide sprayer[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(1): 33 ~ 38.
- Frost A R. Pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 46: 55 ~ 70.
- 何培杰,吴春笃,陈翠英,等. 新型喷雾混药装置性能研究[J]. 农业机械学报,2001, 32(3): 44 ~ 47.
He Peijie, Wu Chundu, Chen Cuiying, et al. Performance of a new type spraying-mixing apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(3): 44 ~ 47. (in Chinese)
- Ghate S R, Phatak S C. A compressed air direct injection pesticide sprayer[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1991, 7(2): 158 ~ 162.
- Vondricka J, Lammers P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2009(10): 421 ~ 430.
- Zhu H, Fox R D, Ozkan H E, et al. A system to determine lag time and mixture unifoumity for inline injections sprayers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1998, 14(2): 103 ~ 110.
- 何培杰. 双级射流混药装置理论与实验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2001.
He Peijie. Studies on theory and experiment of two stage jet mixing apparatus [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2001. (in Chinese)
- Xu Youlin, Zhou Fengfang, Guo Jingkun. Flow field simulation of chemical mixing process for direct injection system based on CFD[C]. 2008 ASABE Annual Meeting Paper No. 083604, 2008.

- 8 吕晓兰, 何雄奎, 宋坚利, 等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 95 ~ 100.
Lü Xiaolan, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Analysis of spray process produced by agriculture flat-fan nozzles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 95 ~ 100. (in Chinese)
 - 9 Smith R W, Miller P C H. Drift predictions in the near nozzle region of a flat fan spray [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 59(2): 111 ~ 120.
 - 10 卞晓静. 横流条件下垂直动量射流数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 530 ~ 533.
Bian Xiaojing. Numerical simulation of vertical momentum jet in cross-flow [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 530 ~ 533. (in Chinese)
 - 11 姜国强, 李炜. 横流中有限宽窄缝射流的旋涡结构[J]. 水利学报, 2004, 35(5): 52 ~ 58.
Jiang Guoqiang, Li Wei. Vortex structure of slot turbulent jets in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5): 52 ~ 58. (in Chinese)
 - 12 李国能, 周昊, 杨华, 等. 横流中湍流射流的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 87 ~ 91.
Li Guoneng, Zhou Hao, Yang Hua, et al. Numerical study of turbulent jet in cross-flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 87 ~ 91. (in Chinese)
 - 13 李炜, 姜国强, 张晓元. 横流中圆孔湍射流的旋涡结构[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 576 ~ 582.
Li Wei, Jiang Guoqiang, Zhang Xiaoyuan. Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 576 ~ 582. (in Chinese)
 - 14 袁丽蓉, 沈永明, 郑永红. 用 VOF 方法模拟横流下窄缝紊动射流[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 155 ~ 160.
Yuan Lirong, Shen Yongming, Zheng Yonghong. Simulation on a slit-type turbulent jet in a cross-flow using the VOF method [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 155 ~ 160. (in Chinese)
 - 15 张燕, 樊靖郁, 王道增. 横流冲击射流尾迹涡结构的实验研究[J]. 力学季刊, 2005, 26(4): 539 ~ 543.
Zhang Fan, Fan Jingyu, Wang Daozeng. Experimental study for wake vortices of an impinging jet in crossflow [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4): 539 ~ 543. (in Chinese)
 - 16 张京, 杨雪玲, 何雄奎, 等. 改进双圆弧罩盖减少雾滴飘失试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 67 ~ 71.
Zhang Jing, Yang Xueling, He Xiongkui, et al. Improved double-foil shield for reducing spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 67 ~ 71. (in Chinese)
-

(上接第 79 页)

- 9 李羊林, 吴春笃, 傅锡敏. 双级射流混药装置的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 172 ~ 174.
Li Yanglin, Wu Chundu, Fu Ximin. Experimental study on two-stage jet mixing apparatus [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 172 ~ 174. (in Chinese)
- 10 何培杰, 陈翠英, 吴春笃, 等. 射流混药装置混合管流场数值计算[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 13 ~ 16.
He Peijie, Chen Cuiying, Wu Chundu, et al. Numerical computation of mixing pipe flow-field in jet mixing apparatus pesticide mixture [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(2): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 11 何培杰, 陈翠英, 吴春笃, 等. 两级射流泵混药装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 57 ~ 60.
He Peijie, Chen Cuiying, Wu Chundu, et al. Experimental investigation of mixing apparatus with two stage jet pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 57 ~ 60. (in Chinese)
- 12 Piantong K, Seehanam W, Behnia M, et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(9): 2 556 ~ 2 564.
- 13 Zhu Y, Cai W, Wen C. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5 ~ 6): 898 ~ 905.
- 14 Cho N, Hwang I, Lee C, et al. An experimental study on the airlift pump with air jet nozzle and booster pump [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21 (Supp. 1): 19 ~ 23.